

УДК 621.373.8

## УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГИЕЙ ГЕНЕРАЦИИ CuBr-ЛАЗЕРА

Ф.А. Губарев<sup>1,2</sup>, В.Ф. Федоров<sup>2</sup>, К.В. Федоров<sup>1</sup>, Г.С. Евтушенко<sup>1</sup><sup>1</sup>Томский политехнический университет

E-mail: ime@tpu.ru

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

E-mail: qel@iao.ru

Показана возможность управления энергией генерации CuBr-лазера с транзисторным коммутатором путем введения дополнительного импульса с регулируемой амплитудой перед основным импульсом возбуждения. Увеличение амплитуды дополнительного импульса позволяет уменьшать энергию в импульсе генерации как частично, так и до полного его подавления. Реализована амплитудная модуляция импульса генерации низкочастотным гармоническим сигналом.

**Ключевые слова:**

Лазер на парах металла, CuBr-лазер, управление, транзисторный коммутатор, модуляция излучения.

**Key words:**

Metal-vapor laser, copper-bromide laser, solid-state switch, lasing control, lasing modulation.

**Введение**

Отличительной особенностью лазеров на парах металлов, в частности, лазеров на парах бромида меди, является импульсно-периодический режим работы с высокой частотой следования импульсов и высокой энергией в импульсе генерации [1, 2]. Для ряда применений лазеров на парах металлов (ЛПМ), таких как микрообработка материалов, передача информации, импульсное воздействие на среду и др., требуется управление параметрами лазерного излучения, как средней мощностью, так и энергией в каждом отдельном импульсе генерации.

Одним из методов управления мощностью генерации лазера является цуговый режим работы, при котором пауза между цугами импульсов формируется путем выключения импульсов накачки. Такой режим работы может успешно применяться при работе с активными элементами лазеров, имеющими внешний нагрев [3]. Однако особенностью цугового режима работы лазеров на парах галогенидов металлов (ЛПГМ), в частности, на парах бромида меди, является нелинейная зависимость энергии в первых импульсах цуга от паузы между цугами, обусловленная восстановлением галогенида в межимпульсный период [4–6]. Это приводит к усложнению алгоритма управления средней мощностью излучения лазера и делает практически невозможным регулирование импульсной мощности и энергии в импульсе.

В работах [7–12] рассмотрены методы оперативного управления характеристиками излучения ЛПМ путем введения дополнительных импульсов к основному импульсу возбуждения. Механизм управления заключается в воздействии дополнительными импульсами на концентрацию атомов металла в метастабильном состоянии. При этом воздействие может проявляться как в снижении скорости релаксации метастабильного уровня в межимпульсный период [7–10], так и в его заселении непосредственно перед основным импульсом накачки [11, 12]. При таком управлении энер-

говклад в разряд остается постоянным, независимо от того, имеет ли место генерация или нет. Это важно как в случае саморазогревных ЛПМ [13], так и для ЛПГМ, когда импульс накачки одновременно осуществляет и диссоциацию молекул галогенида, и накачку лазерных уровней. Регулярный характер импульсов возбуждения обеспечит стационарную концентрацию атомов меди, соответственно, энергия в импульсах генерации будет зависеть только от положения и амплитуды дополнительного импульса (его влияние на фоне основного импульса незначительное). Недостатком данного способа управления является наличие двух импульсных источников накачки (для формирования дополнительного и основного импульсов возбуждения), что приводит к увеличению массогабаритных параметров и стоимости устройства, особенно если в качестве коммутаторов используются водородные тиратроны или другие газоразрядные приборы.

Одной из причин, ограничивающих применение ЛПМ, является необходимость формирования коротких высоковольтных импульсов возбуждения с крутым передним фронтом. Поэтому источники накачки ЛПМ, как правило, строятся на основе тиратронов [1] или транзисторных ключей с последующей магнитной компрессией [13]. Для возбуждения газоразрядных трубок (ГРТ) небольшого активного объема может применяться схема с последовательным соединением однотипных ячеек [14–16]. Преимуществом такой схемы является возможность оперативного управления формой импульса возбуждения или амплитудой дополнительного импульса без применения еще одного импульсного источника накачки.

В работе [16] реализовано управление энергией в каждом импульсе генерации путем формирования «полки» на переднем фронте импульса накачки. Целью настоящей работы являлась реализация управления энергией в импульсе путем введения дополнительного импульса регулируемой амплитуды перед основным импульсом возбуждения.

### 1. Техника эксперимента

В экспериментах использовалась конструкция активного элемента с внешним нагревом, аналогичная описанной в работах [3–5]. Кварцевая газоразрядная трубка имеет длину рабочего канала 40 см и внутренний диаметр 1 см, средняя мощность генерации в установившемся режиме 0,3 Вт. Накачка осуществляется с использованием схемы на основе транзисторных ключей (IGBT-транзисторы типа IRGPS60B120KDP), рис. 1, высоковольтная часть схемы подробно описана в [16]. Основные импульсы накачки имеют длительность 300 нс, передний фронт 30 нс, амплитуду 5 кВ и следуют с частотой 15 кГц, напряжение на выходе выпрямителя  $U_B=1$  кВ. Пунктиром показана схема формирования сигналов управления силовыми транзисторами.

Модулятор формирует дополнительный импульс, который предшествует основному импульсу и синхронизован с импульсом задающего генератора. Амплитуда дополнительного импульса может изменяться по заданному закону (например, линейному или гармоническому) в зависимости от напряжения на входе модулятора. Изменение амплитуды дополнительного импульса происходит обратно пропорционально входному сигналу, т. е. чем больше напряжение на входе модулятора  $U_M$ , тем меньше амплитуда дополнительного импульса. На рис. 2 приведены формируемые схемой управления сигналы, поступающие на затворы силовых транзисторов при разных уровнях сигнала

на входе модулятора. Осциллограммы регистрировались при отключенном высоковольтном выпрямителе ( $U_B=0$ ) и постоянном напряжении  $U_M$ .

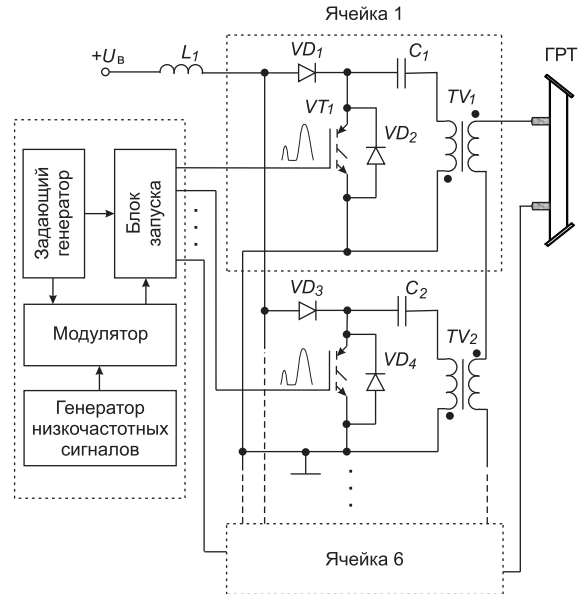


Рис. 1. Схема накачки лазера

Для записи осциллограмм применялся цифровой осциллограф LeCroy WJ-324. Регистрация импульсов напряжения производилась с помощью пробников напряжения Tektronix P6015A (высоковольтный) и LeCroy PP10 (стандартный до 600 В). Импульсы генерации регистрировались коакси-

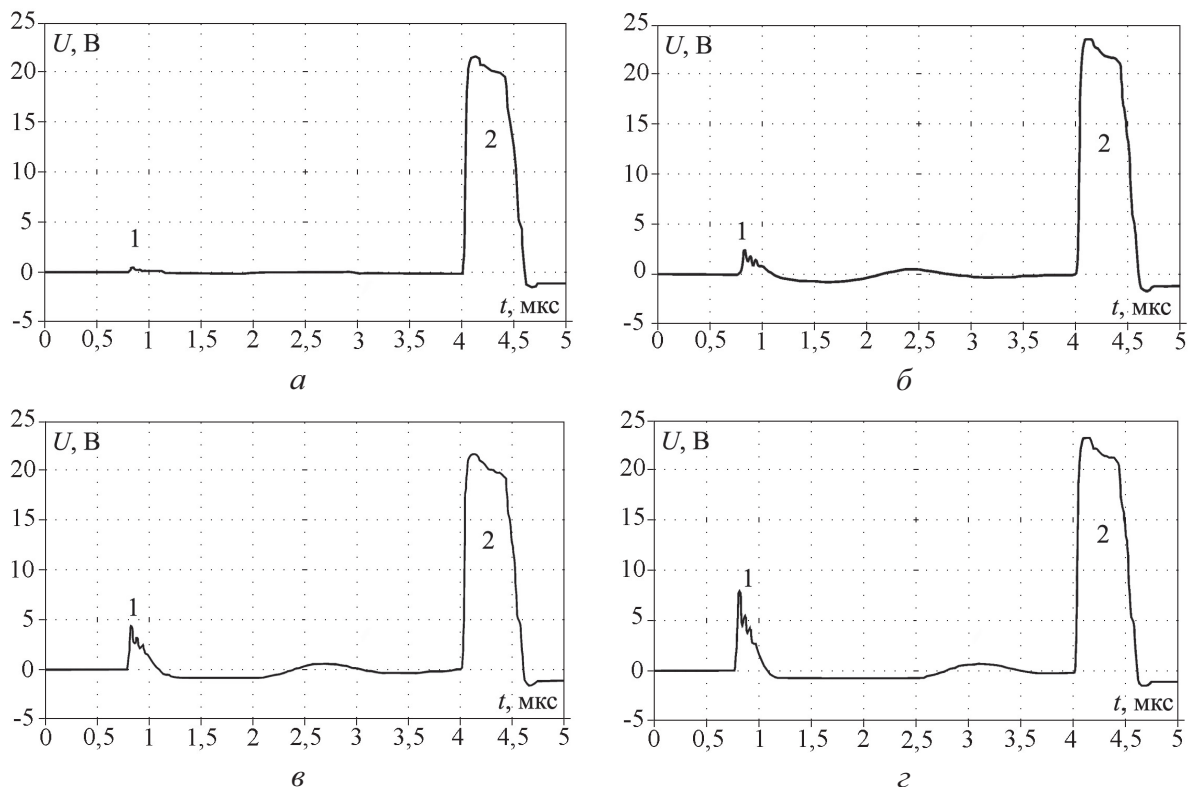


Рис. 2. Импульсы управления силовыми транзисторами. 1) дополнительный импульс; 2) основной импульс.  $U_M$ : а) 10; б) 6,5; в) 3; г) 1 В

альным фотоэлементом ФК-22. Средняя мощность излучения контролировалась измерителем мощности Ophir 20C-SH.

## 2. Результаты экспериментов и обсуждение

Согласно результатам работы [17], предимпульс, намного меньший по амплитуде основного импульса возбуждения и возникающий за несколько микросекунд до него, способен частично или полностью подавить генерацию в основном импульсе. Воздействие дополнительного импульса приводит к снижению инверсии населенностей рабочих уровней за счет заселения метастабильного уровня непосредственно перед основным импульсом накачки. Поскольку энергия дополнительного импульса существенно меньше энергии основного, при таком управлении энерговклад в разряд остается примерно постоянным, независимо от того, имеет ли место генерация или нет.

Задержка между основным и дополнительным импульсами выбрана  $\sim 3,5$  мкс, исходя из того, чтобы при амплитуде напряжения дополнительного импульса  $\sim 800$  В происходило полное подавление генерации. При большей амплитуде дополнительного импульса и большей задержке возможно возникновение генерации в дополнительном импульсе, что нежелательно. Наоборот, при уменьшении задержки (диапазон до  $\sim 200$  нс [16]) для полного

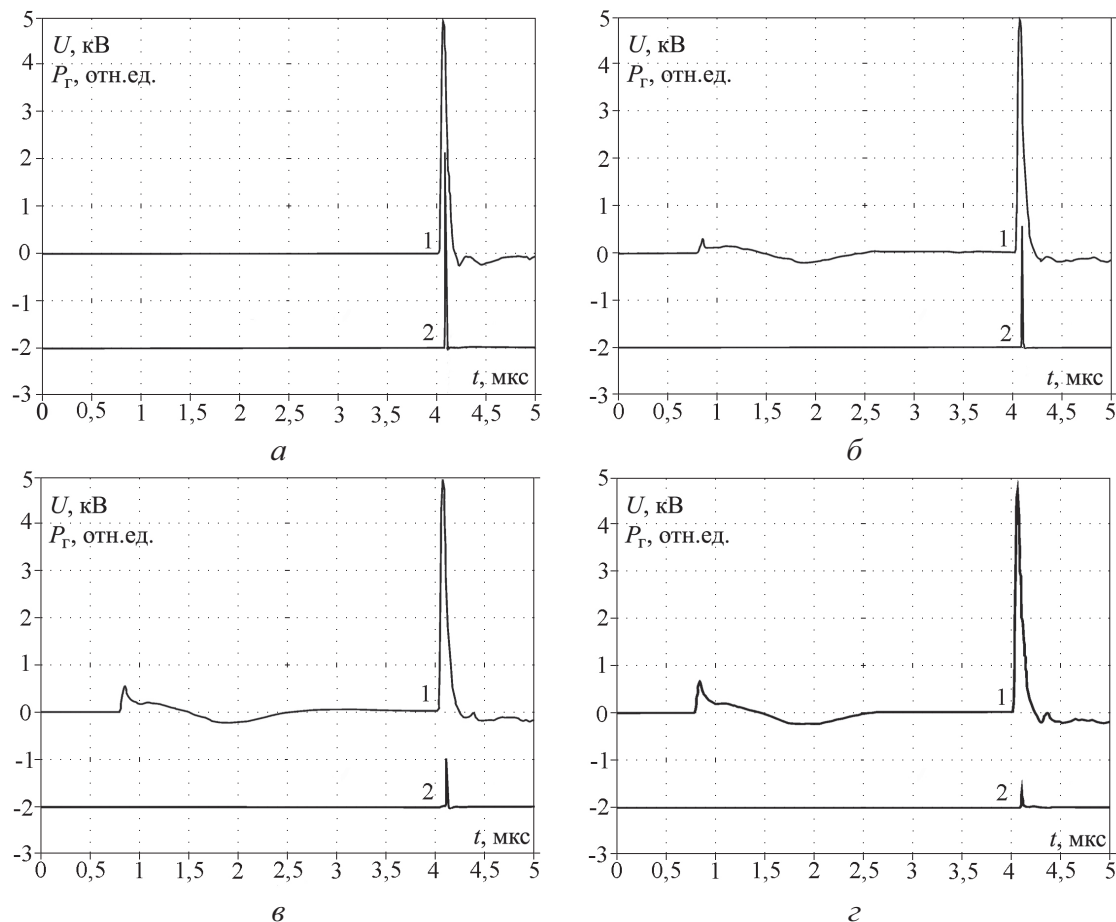
подавления генерации потребуется меньшее напряжение дополнительного импульса, но при этом энергия генерации становится более чувствительной к его изменению.

На рис. 3 приведены осциллограммы напряжения на ГРТ и генерации при разных уровнях сигнала на входе модулятора. Можно отчетливо наблюдать уменьшение амплитуды импульса генерации при увеличении амплитуды дополнительного импульса (уменьшении напряжения  $U_m$ ). Соответственно, уменьшается энергия в импульсе и средняя мощность генерации, как это показано в таблице.

**Таблица.** Зависимость средней мощности  $P_r$  и энергии в импульсе  $E_r$  генерации от величины напряжения на входе модулятора

$U_m$ , В	10	6,5	3	1
$P_r$ , мВт	300	227	108	48
$E_r$ , мкДж	21,4	16,2	7,7	3,4

Известно, что ЛПМ, в частности CuBr-лазеры, работают при высокой частоте следования импульсов с относительно высокой энергией в импульсе генерации, что перспективно для их использования в беспроводной передаче информации. В простейшем случае, это может быть передача звука.



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения на ГРТ (1) и генерации (2).  $U_m$ : а) 10; б) 6,5; в) 3; г) 1 В

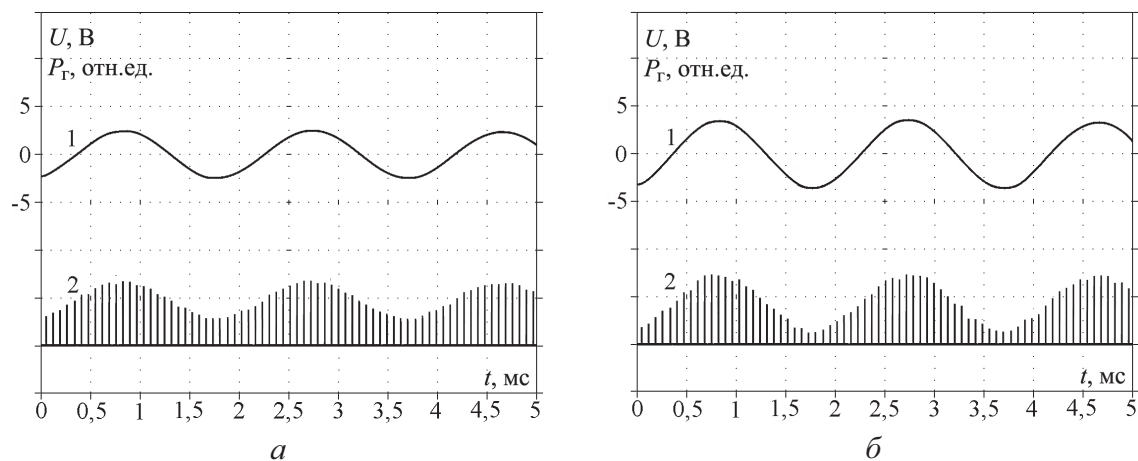


Рис. 4. Осциллограммы импульсов генерации (2) при разной амплитуде управляющего напряжения (1)

При исследовании возможности передачи низкочастотных сигналов с помощью  $\text{CuVg}$ -лазера использовался генератор Г5-112, частота которого изменялась в диапазоне от 500 до 2500 Гц. Сигнал с генератора поступает на вход модулятора, рис. 1. На выходе устройства формируется лазерное излучение, промодулированное гармоническим низкочастотным сигналом. На рис. 4 показаны осциллограммы сигналов с фотозлемента ФК-22 (пропорциональны мощности генерации) при сигналах управления с разной амплитудой.

В зависимости от расстояния, на котором осуществляется прием, выбирался соответствующий фотоприемник. Кроме вакуумного фотозлемента ФК-22 в работе использовался фотодиод ФД-24К. Диод располагался в зоне прямой видимости на расстоянии 10 м. Оптическое излучение, для того, чтобы фотодиод не входил в насыщение, ослаблялось. С помощью используемого фотодиода возможно принимать и отраженный сигнал, например, рассеянный от стены. Сигнал с фотодиода усиливался и фильтровался эквалайзером, кото-

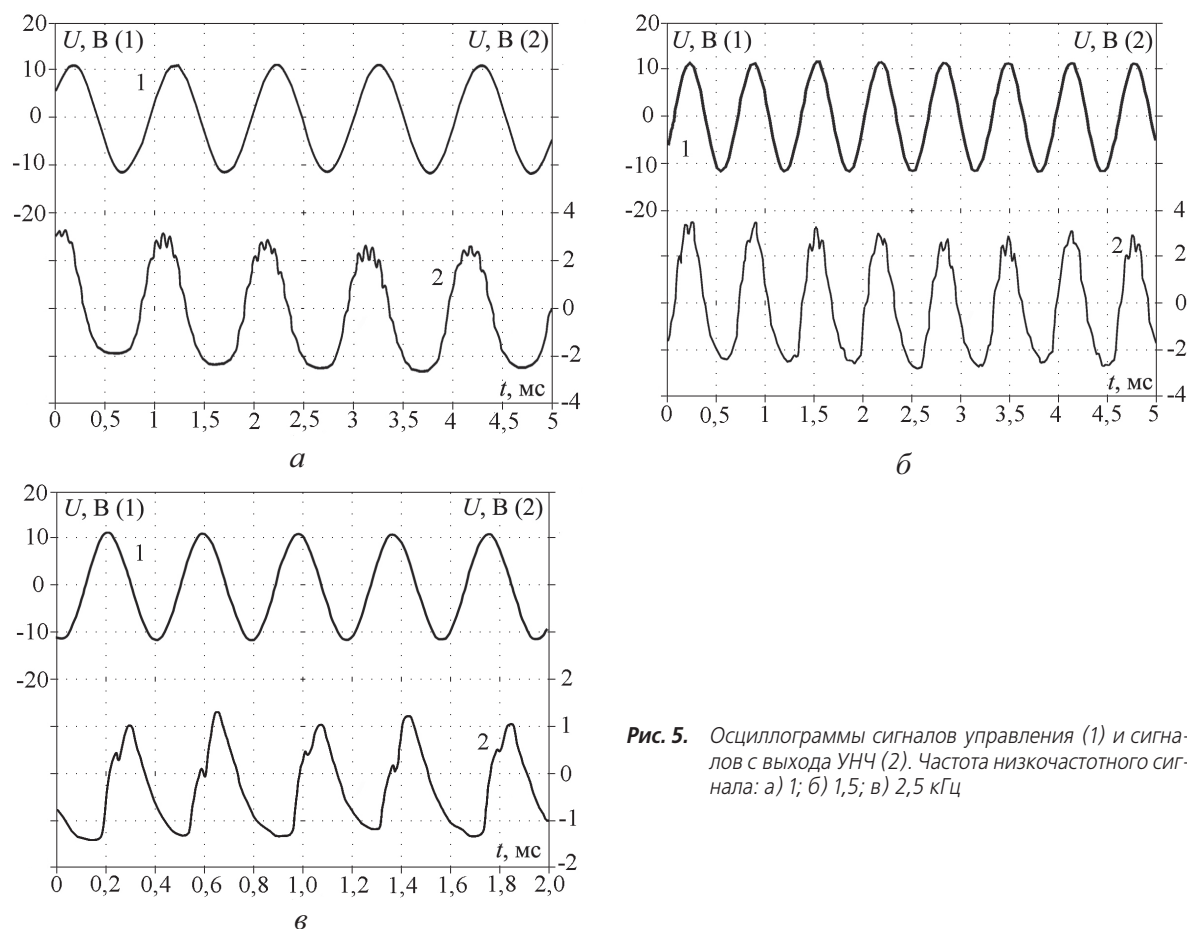


Рис. 5. Осциллограммы сигналов управления (1) и сигналов с выхода УНЧ (2). Частота низкочастотного сигнала: а) 1; б) 1,5; в) 2,5 кГц

рый ослаблял сигнал с частотой выше 3 кГц, в том числе и несущую частоту лазера (15 кГц). Сигнал с выхода усилителя подавался на двухканальный осциллограф вместе с управляющим сигналом.

На рис. 5 приведены осциллограммы принимаемых с помощью фотодиода сигналов при разной частоте модулирующего сигнала. В целом, принимаемый сигнал повторяет по форме задающий (гармонический), причем во всех случаях положительная полуволна передается практически без искажений. Искажение отрицательной полуволны связано с нелинейностью управления излучением в области больших амплитуд дополнительного импульса. Уменьшить искажения можно путем повышения рабочей точки и уменьшения амплитуды задающего сигнала.

### Заключение

Показана возможность управления энергией генерации CuBr-лазера с транзисторным коммутатором путем введения дополнительного импульса с регулируемой амплитудой перед основным импульсом возбуждения. При этом управление может быть реализовано с использованием одного полупроводникового источника накачки. Увеличение амплитуды дополнительного импульса путем частичного отпириания транзисторов в схеме накачки

позволяет уменьшать энергию в импульсе генерации как частично, так и до полного его подавления.

Возможность управления энергией генерации может использоваться для передачи информации, в частности модулированного сигнала. Реализована передача низкочастотных сигналов в полосе частот 0,5...2,5 кГц с помощью импульсно-периодического лазера на парах бромида меди. Такая система может использоваться в системах загоризонтной телефонной связи. Развитием объекта исследования может быть как повышение мощности передатчика (как следствие, увеличение дальности) и частоты работы лазера (улучшение качества передачи информации), так и исследование возможностей использования оптических сигналов, отраженных от атмосферных объектов. Возможно и применение иных лазеров на самоограниченных переходах, излучающих, в частности, в инфракрасной области спектра.

Управление энергией в каждом импульсе генерации будет полезным там, где требуется дозирование энергии. В системах «задающий генератор – усилитель мощности» в качестве задающего генератора может использоваться лазер с полупроводниковым источником накачки и управляемой генерацией.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: проект: РНП.2.1.2/13145.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батенин В.М., Бойченко А.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2-х томах. Т. 1. – М.: Физматлит, 2009. – 544 с.
2. Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 276 с.
3. Активный элемент лазера на парах галогенида металла: пат. 62742 Рос. Федерация. № 2005130448/28; заявл. 30.09.05; опубл. 27.04.07, Бюл. № 12. – 6 с.
4. Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Исследование энергетических характеристик лазера на парах бромида меди с пониженным энерговыделением в разряд // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – № 1. – С. 85–93.
5. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Экспериментальное исследование цугового и ждущего режимов работы лазера на парах бромида меди // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 111–114.
6. Торгаев С.Н., Губарев Ф.А., Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданев О.В. Восстановление молекул бромида меди в плазме CuBr-лазера в межимпульсный период // Известия вузов. Сер. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 2. – С. 81–84.
7. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. Лазер на парах меди со стабилизированными выходными параметрами // Квантовая электроника. – 1983. – Т. 10. – № 5. – С. 974–980.
8. Евтушенко Г.С., Кирилов А.Е., Кругляков В.Л., Полунин Ю.П., Солдатов А.И., Филонова И.А. Управление длительностью генерации лазера на парах меди // Журнал прикладной спектроскопии. – 1988. – Т. 49. – № 5. – С. 745–751.
9. Способ возбуждения импульсных лазеров на самоограниченных переходах: пат. 2082263 Рос. Федерация. № 5035482/25; заявл. 02.04.92; опубл. 20.06.97.
10. Polunin Yu.P., Soldatov A.N. A multiple-wavelength metal vapor lasers with controllable lasing characteristics in visible and IR range // Atomic and Molecular Pulsed Lasers: Proc. 9<sup>th</sup> Intern. Conf. – Tomsk, IAO SB RAS, 2009. – P. 35.
11. Способ возбуждения импульсных лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов, работающих в режиме саморазогрева, и устройство для его осуществления: пат. 2251179 Рос. Федерация. № 2003120867/28; заявл. 11.04.03; опубл. 27.04.05, Бюл. № 12. – 15 с.
12. Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г., Карпухин В.Т., Маликов М.М., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. Энергетические характеристики излучения саморазогревного промышленного лазера KULON-10 Cu-M // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37. – № 8. – С. 765–769.
13. Иванов Е.В., Мошкунев С.И., Хомич В.Ю. Магнитотранзисторный генератор для питания лазера на парах меди // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 1. – С. 88–90.
14. Суханов В.Б., Татур В.В. Оптимизация режима работы источника накачки CuBr-лазера с транзисторным коммутатором // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 314. – № 2. – С. 108–110.
15. Тригуб М.В., Торгаев С.Н., Федоров В.Ф. Полупроводниковые источники накачки CuBr-лазеров // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 164–168.
16. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Тригуб М.В. Управление генерацией CuBr-лазера // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 147–151.
17. Юдин Н.А. Влияние предимпульсных параметров плазмы на частотно-энергетические характеристики лазера на парах меди // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19. – № 2–3. – С. 145–150.

*Поступила 23.06.2011 г.*